# 低融点合金を利用した折紙型衝突エネルギー吸収体の逐次成形法の開発

埼玉工業大学　工学部機械工学科
教授　趙　希禄
（2023 年度 一般研究開発助成 AF-2023006-B2）

**キーワード**：逐次成形法，低融点合金，折紙型衝突エネルギー吸収体

## １．研究の目的と背景

自然災害や自動車衝突などの被害を低減するため，様々な衝突エネルギー吸収構造が開発されている．衝突事故や地震が発生する際に，できるだけ多くの衝突エネルギーを構造物の圧潰変形に吸収させることによって，車両や建物等が全面崩壊ではなく，できるだけ元の形状に近い形に維持させるのは研究開発の目標となっている．

通常，薄肉筒状の衝突エネルギー吸収体が軸方向から衝突される時，エネルギー吸収体の圧潰変形は横へ倒れることで，荷重値が大きく低下してしまい，衝突エネルギー吸収性能も大きく低下する現象は見受けられる．

この問題を改善するために，薄肉筒状の折紙型衝突エネルギー吸収体は提案され，側面壁に折線を入れることによって圧潰変形の座屈形状をコントロールすることによって，衝突エネルギー吸収性能を大きく向上することが確認されているが，3 次元的複雑な形状を持つことで，折紙型衝突エネルギー吸収体の加工問題は未解決課題として注目されている．

折紙型衝突エネルギー吸収体の薄肉管に近い形状特徴からハイドロフォーミング法で加工することは容易に考えられるが，それを適用する場合，大型成形設備および複雑な油圧制御システムが必要となり，加工コストは高いだけでなく，毎回の成形には油をパイプの中に充填し，油がパイプ裏表面に付着して油の消耗と成形品の洗浄などの問題が存在する．

本研究では，ハイドロフォーミング法の内部油圧の代わりに，低融点合金（融点温度 70℃）を利用した新しい廉価な逐次塑性成形法を提案して，複雑な油圧制御システムを省くだけでなく，加工に必要な加工エネルギーも大幅に節約することができる．本研究の実施により幅広い産業分野に適用できる新しい衝突エネルギー吸収体の実用展開に大きく寄与できる．

## ２．折紙型衝突エネルギー吸収体

図 1(a)に示すように，通常の矩形断面の薄肉構造は軸方向への衝撃荷重が加えられた時，座屈が発生するため圧潰変形は横へ倒れるようになって，その衝突エネルギー吸収性能が大きく低下することが見受けられる．

このような横へ倒れる圧潰変形の問題を改善し，衝突エネルギー吸収性能を向上するため，図 1(b)に示す折紙型衝突エネルギー吸収構造（Origami Crash Energy Absorb Structure，以下 OCA）が提案され，衝突過程においては，OCA の圧潰変形は軸方向に沿って座屈しわが積み重ねながら進められるため，その衝突エネルギー吸収性能は大幅に改善できることはシミュレーションで確認できている．

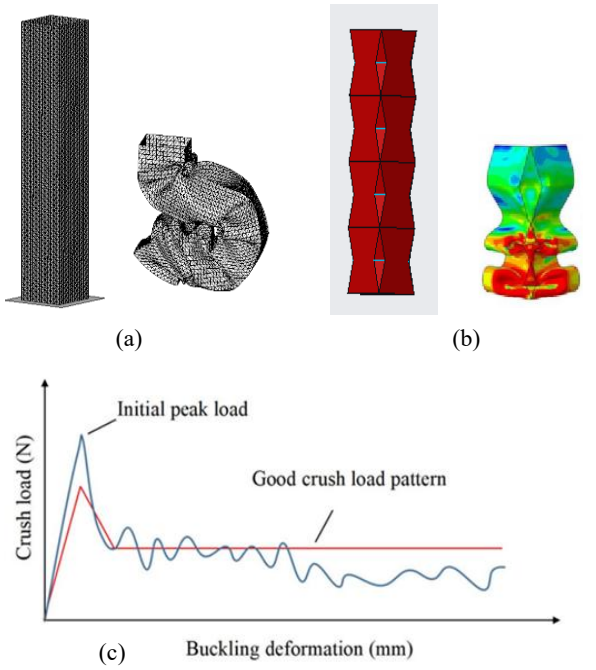



図 1.　衝突エネルギー吸収体と圧潰変形モード

OCA の基本構成および形状パラメータを図 2 に示す．図中により，OCA は軸方向に沿った複数の基本モジュールから繋げて構成されており，各基本モジュールは四角形（赤線）と八角形（青線）から交互に構成され，四角形と八角形の周長は同じく 4b であり，c はコーナー部の辺長である．

図 2 に示す OCA 構造を加工するには，方管のようなパイプ材を利用してハイドロフォーミング法で加工することは容易に考えられるが，大型成形設備および加工コストは高くなる欠点がある．

また，OCA 形状を分解して，部分的なパーツを別々に加工してから，溶接で OCA を組み立てて加工する方法が考えられるが，加工精度やコスト等の問題が存在する．

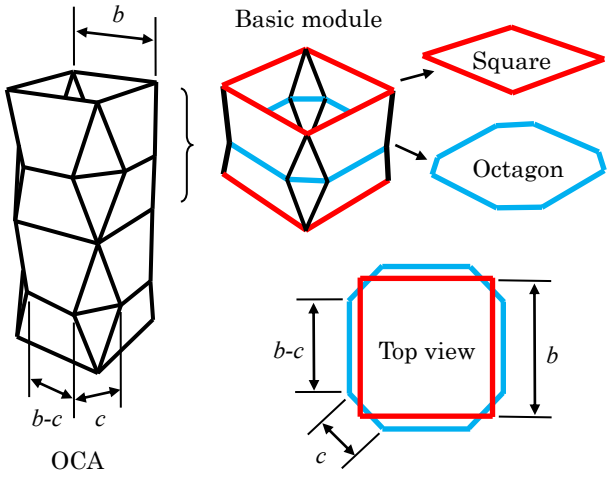



図 2.　OCA 構造とその形状パラメータ

## ３．低融点合金を利用した逐次成形法の提案

ここでは，ハイドロフォーミング法の内部油圧の代わりに，低融点合金（融点温度 70℃）を利用した新しい廉価な逐次塑性成形法を提案して，複雑な油圧制御システムを省くだけでなく，加工に必要な加工エネルギーも大幅に節約することができる．

提案する逐次塑性成形方法を図 3 に示し，軸方向に沿って正方形断面の成形素材を段に分けて，4 つの成形治具を使い，正方形断面の対角線方向に沿って成形素材を押し付けることによって，1 段の塑性成形が完了する．次に成形素材を軸方向に沿って 1 段分を前へ移動させて，次段の塑性成形を行っていく．このような加工手順を繰り返して最後に図 2 に示すような OCA 構造が得られる．

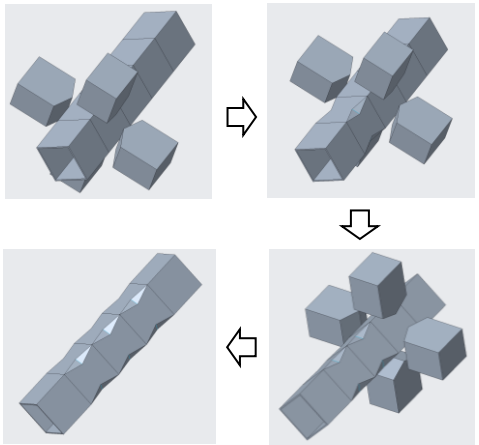


図 3.　逐次塑性成形方法

図 3 に示す逐次塑性加工法を実現するために必要な加工装置は，図 4 に示すような本体ブロックと 4 つの成形治具セットから構成される．

成形治具セットは，成形の進行方向に沿って，位置決め治具，塑性成形治具と固定治具の順番で 3 つの治具を設置して，さらに位置決め治具と固定治具の下にそれぞれ弾性ゴムを設置してある．

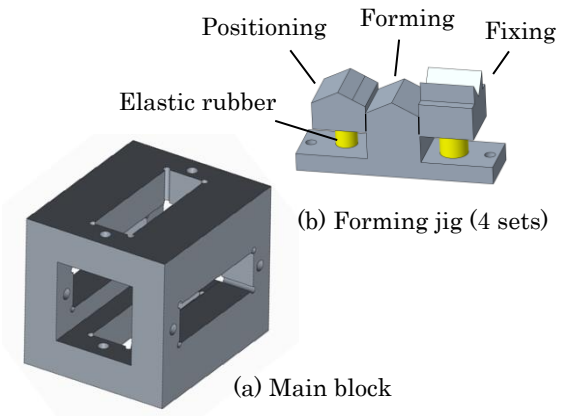



図 4.　本体ブロックと成形治具セット

実際に加工した本体ブロックと成形治具セットを図 5 に示す．組み立てた成形治具セットは合わせて 4 つあり，図中に示すようにそれぞれ本体治具に挿しこむように設定してある．

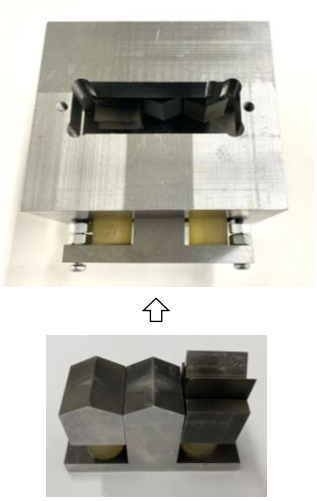


図 5.　加工した逐次成形用の加工治具

さらに，組み立てられた本体ブロックと成形治具セットを図 6 に示すように油圧プレスにセットして，成形実験用の装置が完成される．

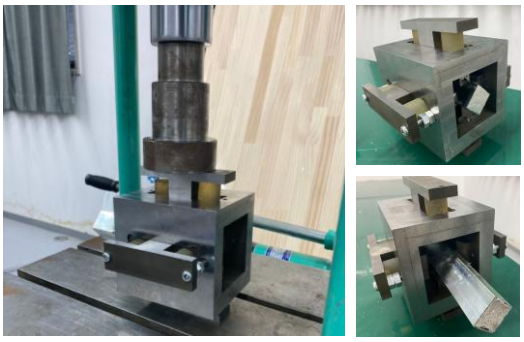


図 6.　逐次塑性成形法の検証実験装置

具体的な逐次成形工程については，図 7 に示す断面図を使い次のようにまとめることができる．図中では，①は位置決め治具，②は成形治具，③は固定治具，④は成形素材である．

ステップ 1 では，成形素材④を本体ブロックの中に挿し込み，油圧プレスで成形荷重を加えて，成形治具セットを成形素材④に押し付けて，その際に，弾性ゴムが圧縮変形するため，位置決め治具①と固定治具③は後方へ移動されて，固定治具③はしっかり成形素材④を固定させて，真ん中の成形治具②が成形素材④に強く押し込んで塑性成形が発生させてから，成形治具セットを上げて，1 回目の成形が完成する．

ステップ 2 では，成形素材④を前へ 1 段分に移動して，油圧プレスで成形治具セットを成形素材④に押し付けて，その際に，位置決め治具①は既に成形した部分形状に合わせるように押さえて行くため，成形素材④を正しく位置決めさせて，固定治具③はしっかり成形素材④を固定させて，同時に成形治具②が成形素材④に強く押し込んで塑性成形が実現できる．それから，成形治具セットを上げて，もう 1 段目の成形が完成する．

ステップ③以後では，ステップ 2 のプレス成形作業を繰り返し行って行けば，最後に図 2 に示す OCA 構造を得ることができる．

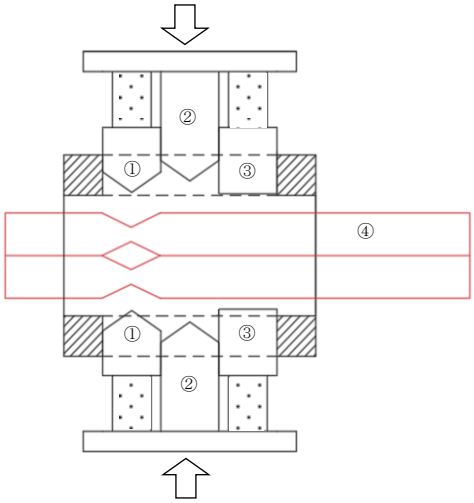



図 7.　逐次塑性成形法の加工流れ

ただし，図 6 に示すように本研究の成形検証実験に使用した油圧プレスでは，一方向のプレス成形しか実施できないため，図 7 の成形過程では，1 回塑性成形が完成した後，本体ブロックを 90 度回転し，成形後の成形治具セットをしっかりボルトで締め付けてから，もう 1 回塑性成形を行う必要がある．

さらに，実際に図 7 の逐次塑性成形法を使いプレス成形を行う場合，正方形断面の成形素材の内部に空白のままであれば，プレス成形で得られる形状は部分的な窪みが生じされ，図 3 に示すような OCA 構造形状を得ることができない．すなわち，プレス成形する際に，成形素材の内部から素材壁に対する支えられる内部サポート材料を詰める必要がある．ただし，この内部サポート材料は本来の正方形断面成形素材の塑性変形に影響しないことが要求されている．

この問題を解決するため，本研究では，図 8 に示すような市販の低融点合金を適用する．低融点合金は低い融点を特徴とする合金である．



図 8.　低融点合金とその利用方法

本研究に使用する低融点合金の融点は 70℃であり，図 7 に示すように低融点合金を 70℃以上加熱すれば，低融点合金は固体から液体に変えてから，成形素材の内部に注入して，温度が自然に 70℃以下に下がる時，低融点合金は再び固体になり，成形素材の内部サポート材料として使用することができる．

一方，プレス成形した後，低融点合金を成形素材の内部から取り出す時，図 8 に示すように，水の中に入れて加熱すれば，低融点合金は成形素材の内部から自動的に流出することができる．また低融点合金は水に反応しない特性があり，一度使用した低融点合金はほとんど消耗することはなく，繰り返し使用する利点がある．

## ４．試作実験

本研究の提案した逐次塑性加工法の加工性能を検証するため，図 6 に示す逐次塑性加工装置を利用して試作実験を実施した．

成形素材として図 9 に示す方管材を利用して，材質は一般構造用圧延鋼材 SS400 で，辺長は 28mm，肉厚は 1.2mm，長さは 250mm である．

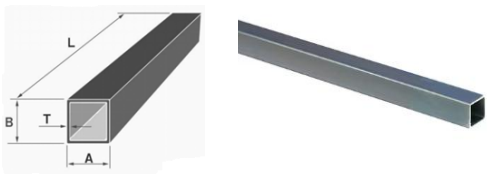



図 9.　成形検証実験に使用する方管材

プレス成形加工の前に，図 10 に示すように低融点合金を加熱してから，成形素材の内部に注入して，その際に，まず少量な低融点合金を入れて，少し止めて，内部に入れた低融点合金は固まりしっかり内部の底ができることが確認してから，その後の低融点合金を徐々に注入し，内部に空気が巻き込まれないことを注意する必要がある．

成形素材の内部に低融点合金を注入した後，図 11 に示すように成形装置の本体ブロックの中に入れて，油圧プレスで成形させて，得られた加工品の様子は図 11 の右図に示すようになった．

このようなプレス成形作業を軸方向に沿って繰り返し行って行けば，最終的に OCA 構造が得られる．

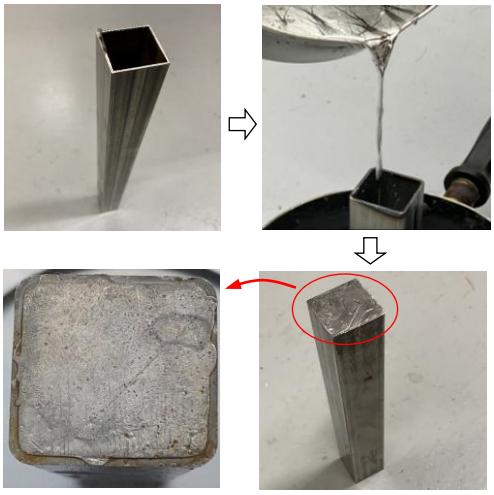


図 10.　成形検証実験に使用する成形素材

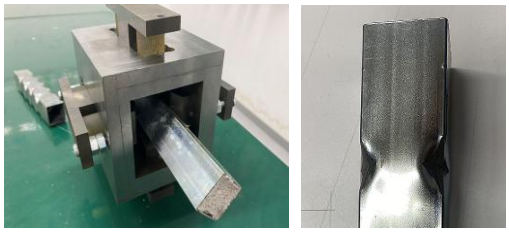


図 11.　逐次塑性成形工程と加工した様子

## ５．圧潰変形性能の検証実験

前節の逐次塑性加工法で得られた OCA 構造の衝突エネルギー吸収性能を検証するため，図 12 に示すようにオートグラフ試験機による圧潰試験を実施した．

圧潰試験では，事前に設定した試験条件として，オートグラフ試験機の圧縮治具の圧縮移動速度を 2mm/s と設定して，圧縮治具の最大行程が 80mm に達した時に強制停止とした．

図 13 に示すのは，圧潰実験で得られた計測結果から纏めた圧潰荷重変位曲線および代表点での圧潰変形の様子である．




図 12.　圧潰変形性能の検証実験の様子

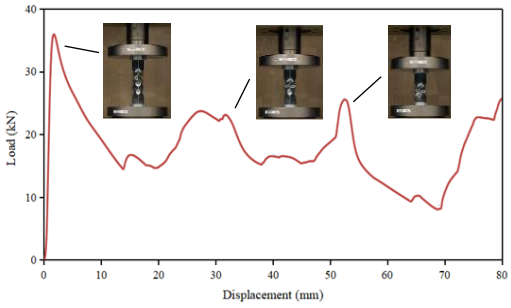



図 13.　圧潰変形性能検証実験の結果

図 13 により，成形した OCA 構造の圧潰変形は長く続けられて，変形途中においては，圧潰荷重は比較的高いレベルを維持されて，圧潰変形は横へ倒れる座屈現象が発生していなく，さらに荷重変位曲線と横軸の間に挟む面積で表わす衝突エネルギー吸収量は比較的大きいことが確認できる．よって，成形した OCA 構造は衝突エネルギー吸収材として適用されることを示している．

## ６．まとめ

本研究は，低融点合金を適用するため，普通の熱水を使い容易に OCA の内部から低融点合金を取り出せ，水と自動分離となり，繰り返し使用の消耗量はほぼゼロである．また大型加工設備を使わず，小規模な加工装置だけで加工することができ，専用の加工工場だけでなく，中小企業でも本加工法を適用することが寄与できる．

## 謝　辞

本研究は，公益財団法人天田財団による一般研究開発助成(AF-2023006-B2)で実施された．ここに記して同財団に深く感謝申し上げる．

## 参考文献

1) 趙希禄，胡亜波，萩原一郎，折紙工学を利用した円筒薄肉構造物の衝突圧潰特性の最適設計，日本機械学会論文集 A 編，Vol.76，No.761，pp.10-17，2010 年.